

ФИЗИКА

УДК 539.144.3, 539.144.7

*Н. С. Мартынова*¹, *С. А. Елисеев*²,
Ю. Н. Новиков^{1,2}, *П. Е. Филянин*¹

**НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНАЯ
ЯДЕРНАЯ ИЗОМЕРИЯ**

¹ Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

² НИЦ «Курчатовский институт»,
Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова,
Российская Федерация, 188300, Ленинградская область, Гатчина

Целью данной работы было объединить и структурировать информацию о ядерных изомерах с акцентом на их применение в различных смежных областях науки. Феномен изомерии подробно изучается в ядерной физике, однако он оказывается востребованным и в других областях знаний. Эта роль изомеров, находящихся в диапазоне энергий, соответствующем низковозбуждённому состоянию, кратко систематизирована в работе. Проведён анализ актуальных задач физики, в решении которых ядерные изомеры могут играть важную роль. К ним относятся, например, «дилемма гамма-лазера», посвящённая проблемам создания гамма-лазера на изомерных уровнях, и возможности широкомасштабного практического использования низкоэнергетичного состояния в изомере ^{229}Th . Беспрецедентно малая энергия ядерного возбуждения этого изомера позволяет использовать его для создания нового рекордного по точности и стабильности эталона частоты (времени). Обсуждена роль низколежащих ядерных уровней в различных астрофизических процессах и в проблемах космохронологии. Показано, как эти уровни, заселяясь в высокотемпературных звёздных условиях, существенно влияют на эффективную вероятность распада астрофизических хронометров. Требования сверхточного определения энергий изомерных уровней обеспечиваются масс-спектрометрией с использованием ионных ловушек Пеннинга, описанию которых посвящён отдельный параграф. Библиогр. 32 назв. Ил. 6.

Ключевые слова: низколежащие уровни возбуждения ядер, изомеры, астрофизика, космохронология, гамма-лазер, эталон частоты.

Для цитирования: Мартынова Н. С., Елисеев С. А., Новиков Ю. Н., Филянин П. Е. Низкоэнергетичная ядерная изомерия // Вестник СПбГУ. Физика и химия. 2017. Т. 4 (62). Вып. 3. С. 236–248. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu04.2017.301>

LOW ENERGY NUCLEAR ISOMERS

¹ St. Petersburg State University,

7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² B. P. Konstantinov Nuclear Physics Institute, NIC Kurchatov Institute, Gatchina, Leningrad district, 188300, Russian Federation

This paper aims to compile and to structure information about the low energy nuclear isomerism and its use in different areas of convergent sciences. A phenomenon of isomerism investigated in nuclear physics is of a great interest for different areas of science. An analysis has been carried out for most interesting issues of physics, which could be overcome in the nearest future if nuclear isomerism is used. As an example the long standing dilemma of gamma-laser, which can be based on the isomeric states, and a low-energy state of ^{229}Th are considered. Unprecedented the low energy nuclear excitation of the isomer makes possible its use to create a new record on accuracy and stability of the frequency standard (time). The place of low energy states in some astrophysical processes and in nuclear cosmochronology is discussed as well. It is shown how these low energy nuclear excited states, populated in high-temperature stellar conditions, significantly affect the effective rate of decay of astrophysical chronometers. Requirements of precise determination of the energies of the isomeric levels can be successfully provided by mass spectrometry using the Penning ion traps. Description of them is given in a separate paragraph. Refs 32. Figs 6.

Keywords: low energy nuclear states, nuclear isomerism, astrophysics, cosmochronology, gamma-laser, frequency standard.

For citation: Martynova N. S., Eliseev S. A., Novikov Yu. N., Filianin P. E. Low energy nuclear isomers. *Vestnik SPbSU. Physics and Chemistry*. 2017. Vol. 4 (62), iss. 3. P. 236–248. <https://doi.org/10.21638/11701/spbu04.2017.301>

Введение. Впервые интуитивное предположение о существовании ядерной изомерии было высказано Ф. Содди ещё в 1917 г., ровно 100 лет назад! Оно было сделано на основе самых общих наблюдений за радиоактивностью и заключалось в том, что радиоактивные свойства атома зависят не только от заряда и массы атомного ядра, но и от самого его строения [1]. В 1921 г. О. Хан впервые экспериментально обнаружил вещество, которое вело себя двойственно при распаде [2]. С одной стороны, по химическим свойствам оно вело себя в точности как нуклид UX1 (сейчас известный как ^{234m}Pa), а с другой стороны, имело совершенно другой период полураспада. Хан назвал этот нуклид UZ, ныне известный как ^{234}Pa .

В начале 1935 г. группа под руководством И. В. Курчатова обнаружила, что при облучении брома нейтронами, вопреки всем ожиданиям, наблюдается третья компонента распада [3]. Поскольку в естественной смеси брома существуют только два стабильных изотопа, то логично заключить, что при облучении их нейтронами могут получаться тоже только два, но уже радиоактивных, изотопа. Наличие же третьей компоненты распада явно свидетельствовало о существовании нового, ранее не изученного эффекта. Чуть позже в том же году вышла работа, в которой был описан аналогичный эффект, но уже при облучении индия нейтронами [4].

В 1936 г. К. Вайцеккер попытался объяснить этот удивительный феномен в терминах теории углового момента [5]. Тогда он назвал это «спиновой ловушкой», что впоследствии стало ассоциироваться с целым классом изомеров, обладающих большим угловым моментом и относительно большим временем жизни (так называемых спин-изомеров).

Можно смело утверждать, что все эти первые наблюдения и заложили основу для дальнейшего углублённого изучения явления ядерной изомерии, а также стимулировали изучение теории ядра и всей ядерной физики в целом. И несмотря на то, что

этому открытию уже более 80 лет, изучение ядерной изомерии обладает большой значимостью и по сей день, так как может решить ряд актуальных проблем современной физики в её самых различных областях.

В целом разброс физических характеристик ядерных изомеров, обнаруженных на данный момент, очень велик, и с развитием методов ядерной спектроскопии будет только возрастать. Например, времена жизни изомеров колеблются от 10 нс до 10^{16} лет, их спин от 0 до $36\hbar$, энергии возбуждения — от 7 эВ до 36 МэВ [6]. На данный момент нет строгого определения того, каким минимальным временем жизни должно обладать ядерное возбуждённое состояние, чтобы оно считалось изомерным, но наиболее общепринятым значением в литературе является нижняя граница ~ 10 нс.

Традиционно ядерные изомеры делятся на три основные группы в зависимости от механизма, препятствующего их распаду. Так, существуют спин-изомеры, К-изомеры и изомеры формы. Самым распространённым типом являются спин-изомеры, распад которых подавлен за счёт большой мультипольности перехода, ввиду большой разницы спинов основного и изомерного состояний. К такому типу относится, например, ^{180m}Ta со спином и чётностью 9^- , в то время как два нижележащих энергетических уровня имеют спины 1^+ — основное состояние, и 2^+ — первое возбуждённое. Таким образом, минимальная мультипольность перехода $\lambda = 7$, что сильно подавляет распад изомерного состояния. Стоит отметить, что ^{180m}Ta является единственным случаем изомера, который присутствует в природе в естественной смеси изотопов тантала в количестве 0,012%. Его распад на сегодняшний день ещё никто экспериментально не наблюдал, и существует только оценка на время жизни в более чем 10^{15} лет. До конца не ясно и происхождение этого изомера в ходе нуклеосинтеза, хотя и считается, что, как и многие другие тяжёлые элементы, он рождается при взрывах сверхновых.

К-изомерами называются такие изомерные состояния, которые проявляются в деформированных ядрах. Разрядка их происходит с большим изменением квантового числа К — проекции полного углового момента на ось симметрии ядра. Хорошим примером такого перехода является γ -разрядка в ^{180}Hf с $\Delta K = 8$ и временем жизни 5,5 ч.

И, наконец, изомеры формы, квазистабильность которых обусловлена сильным различием формы ядер в начальном и конечном состояниях. Изомеры формы могут переходить в основное состояние посредством испускания гамма-квантов или же могут спонтанно делиться на два осколка. Наиболее долгоживущим делящимся изомером на сегодняшний день является ^{242m}Am со временем жизни в 14 мс.

На рис. 1 приведено распределение количества изомеров в зависимости от периода полураспада и энергии возбуждения. Он составлен на основании анализа скомпилированных в работе [7] данных об изомерах. На рис. 2 показана зависимость энергии (слева) и времени жизни (справа) от массового числа нуклида. На рис. 1 видно, что основная масса изомерных уровней обладает низкими энергиями возбуждения (до нескольких сотен килоэлектрон-вольт). Больше всего изомерных уровней, живущих меньше 10^{-5} с. Немалая доля изомерных уровней распределена по времени жизни от 10^{-1} до 10^4 с. На рис. 2 (слева) видно, что из ансамбля, охватывающего все изомерные состояния, явно выделяются уровни в эВ-диапазоне энергий, принадлежащие ^{229m}Th и ^{235m}U . Эти ядерные изомерные состояния в атомном диапазоне энергий представляют особый интерес, и об одном из них будет рассказано ниже. Благодаря столь обширному разбросу, физические величины, характеризующие изомеры, как это следует из рис. 1 и 2, могут применяться в решении актуальных задач в ряде дисциплин от ядерной физики, астрофизики и космохронологии до метрологии и во многих других прикладных вопросах. Кроме того, применение изомеров становится популярным и в медицине. Так,

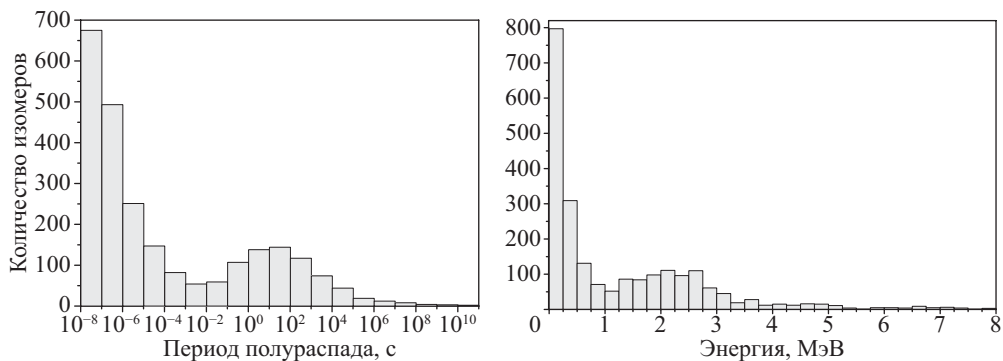


Рис. 1. Распределение количества изомеров по времени жизни (слева) и энергии (справа): данные для построения гистограммы взяты из работы [7]

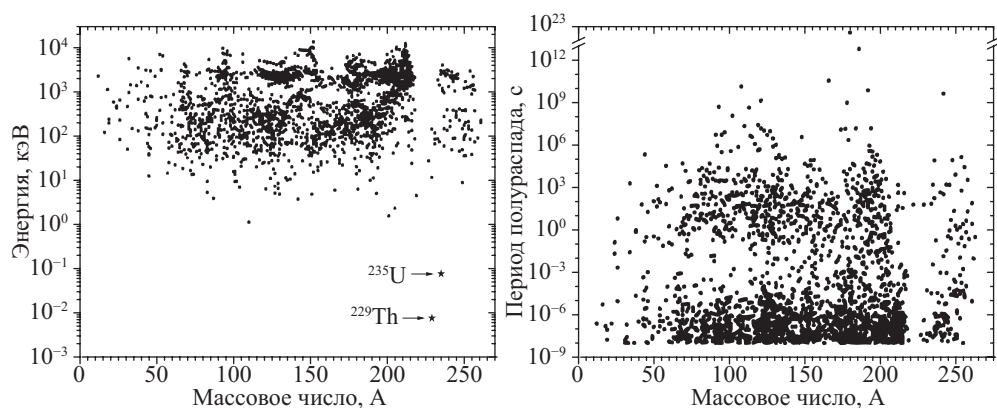


Рис. 2. Энергии (слева) и времена жизни (справа) изомерных состояний нуклидов в зависимости от массового числа: данные взяты из работы [6]; в выборку вошли изомеры с периодами полураспада больше 10 нс

^{99m}Tc с энергией возбуждения 143 кэВ и периодом полураспада 6 ч уже много лет используется в радиоизотопной диагностике опухолей головного мозга.

Как уже отмечалось, исследование явления изомерии в ядрах сыграло большую роль в развитии ядерной физики почти с момента её зарождения. Изомерные состояния, имеющие энергии в очень широком диапазоне, позволили изучить особенности структуры ядра и ядерного взаимодействия, а также вопросы, связанные с динамикой ядерных процессов. Этим вопросам было уделено должное внимание с первых работ, посвящённых изомерии [8]. Интерес к этому явлению проявляется и по настоящее время [9]. В данной работе мы опустим фундаментальную компоненту интереса к изомерам, имеющегося в ядерной физике, и сконцентрируемся на анализе места этого явления в смежных областях науки.

Особую категорию составляют изомеры с небольшими энергиями возбуждения (меньше нескольких сотен килоэлектрон-вольт). Как отмечалось выше, они составляют основную массу изомерных уровней в ядрах (см. рис. 1). Эта категория изомерных состояний, как показано в настоящей работе, конвергируется в различных областях

знаний. Анализу места этих изомеров в понимании тех или иных процессов посвящены нижеследующие параграфы.

Во многих случаях, особенно в метрологии, важнейшими составляющими анализа являются точность и достоверность фактического материала. Так, в настоящее время помимо классической гамма- и электронной спектроскопии для определения энергетического положения изомеров приобретает широкую распространённость высокочувствительная масс-спектрометрия единичных атомов [10], и иллюстрации этого метода посвящён отдельный параграф настоящей работы.

1. Изомерные состояния ^{229}Th и ^{235}U . Самой низкой из известных на данный момент энергией возбуждения ядра является энергия первого возбуждённого состояния в ^{229}Th . Существование этого низколежащего изомерного состояния долгое время не было достоверно доказано. Впервые на его существование было указано в 1976 г. [11], и только спустя 40 лет, в 2016 г., его наличие окончательно подтвердила группа учёных из Мюнхена (Германия) [12].

Точное измерение времени жизни и, особенно, энергии изомерного состояния представляет собой крайне сложную задачу. Наиболее правдоподобное значение энергии $7,6 \pm 0,5$ эВ получено косвенным путём на основании изучения энергетического баланса между самыми низколежащими возбуждёнными состояниями в ^{229}Th [13]. Это значение соответствует оптическому диапазону с длиной волны около 160 нм, а отношение энергии γ -перехода к его естественной ширине составляет предположительно рекордное значение в $\sim 10^{-20}$ [14]. Всё это вселяет надежду на возможность заселения данного уровня при помощи лазерного излучения. Предполагаемое время жизни ^{229m}Th в виде иона составляет более 1 мин [14], однако в нейтральном состоянии он живёт всего лишь 7 ± 1 мс [15]. Это связано с тем, что энергия изомерного состояния превышает энергию связи внешнего электрона атомной оболочки, и в нейтральном состоянии атома с большой вероятностью происходит распад состояния посредством испускания электрона конверсии. Это, в свою очередь, позволит изучить свойства изомерного состояния нуклида путём исследования его распада с испусканием конверсионного электрона [16]. Малая энергия ядерного возбуждения даёт возможность на его использование в новом рекордном по точности и стабильности эталоне частоты (времени). Рекордной стабильности способствует наличие у ядра электронной оболочки, экранирующей его от влияния внешних полей на частоту ядерного перехода. Такого преимущества нет ни у одного из известных эталонов частоты, дающих метрологические данные для различных областей науки и техники. Развитие проекта исследования этого изомера [16] обещает качественные сдвиги в технике (спутниковая навигация, синхронизация систем передачи данных) и в фундаментальной физике (проверка постоянства мировых физических констант, лоренцовой инвариантности; создание гамма-лазера и др.). Один только перечень этих приложений говорит об уникальных возможностях экзотического изомера ^{229m}Th .

Ещё одним интересным случаем является изомерное состояние в ^{235}U , энергия возбуждения которого составляет $76,5 \pm 0,4$ эВ, а время жизни равно 26 мин [7]. На рис. 2 видно, что энергия этого изомера (также как и изомера ^{229m}Th) на несколько порядков отличается от основного массива энергий изомерных уровней, но, к сожалению, она недостижима для лазерного заселения. Однако изомерное состояние ^{235m}U может быть привлечено в экспериментах с ^{229m}Th в качестве реперного источника.

2. Влияние низколежащих возбуждённых состояния на астрофизические процессы. Одной из основных задач такой науки, как астрофизика, является изучение элементного (и, по возможности, изотопного) состава небесных объектов: комет, планет, звёзд и туманностей. Зная химический состав того или иного астрономического объ-

екта, учёные пытаются теоретически это обосновать, аппроксимируя наблюдательные данные своими теоретическими выкладками.

Как известно, в ходе первичного нуклеосинтеза образуются элементы не тяжелее лития, и стандартная модель Большого Взрыва хорошо предсказывает соотношение между ними. В зависимости от массы звезды в ходе горения (слияния водорода или гелия с более тяжёлыми ядрами) в ней могут образовываться элементы от бериллия до железа, что сопровождается большим выделением энергии. Все же остальные элементы, согласно теории их синтеза [17], образуются в более сложных s-, r-, p-, rp-процессах нуклеосинтеза, которые обозначают различные процессы, происходящие в звёздных условиях. Примерно за одну половину всей распространённости нуклидов тяжелее ^{56}Fe ответствен s-процесс медленного захвата нейтронов, за другую — r-процесс быстрого захвата нейтронов, и только небольшой вклад вносят p- и rp-процессы, означающие гамма-захват и быстрый захват протонов соответственно. Исследование путей протекания этих процессов и соответственно теоретическое предсказание состава элементов и их изотопов во Вселенной являются и по сей день актуальной задачей ядерной астрофизики.

Наиболее изученным процессом образования элементов является s-процесс, представляющий собой последовательный захват нейтронов ядром и бета-распад образовавшегося нуклида. Основными параметрами s-процесса являются: с астрофизической стороны — температура, состав и масса звезды, поток и энергия нейтронов в звезде; с ядерной — набор данных о сечениях захвата нейтронов ядрами, периоды полураспада нуклидов, их массы и структура возбуждённых уровней ядер.

В целом достаточно хорошая изученность s-процесса по сравнению с другими процессами объясняется тем, что он происходит вдоль так называемой полосы β -стабильности, где получено множество спектроскопических данных. Однако низколежащие ядерные возбуждённые состояния, не в полной мере учтённые до сих пор, порой могут вносить немалые коррективы. Идея состоит в том, что возбуждённые состояния ядер в горячих звёздных условиях заселяются с немалой вероятностью в соответствии с больцмановским распределением:

$$P_i \sim (2I_i^* + 1) \exp\left(-\frac{E_i^*}{kT}\right),$$

где P_i — заселение i -го уровня с энергией E_i^* и спином I_i^* при температуре T ; k — постоянная Больцмана.

Таким образом, в звёздных условиях нуклид представлен основным и возбуждёнными состояниями, и чем меньше энергия возбуждения уровня и выше температура среды, тем больше «распространённость» этого уровня. Значительное наличие возбуждённых состояний нуклида приводит к возникновению новых каналов его β -превращений, которые по интенсивности ничтожны в земных условиях.

Если по типу распада эти новые каналы являются разрешёнными β -переходами ($\Delta I = 0, \pm 1$; $\Delta \pi = 0$) с ускоренной вероятностью распада, то они превалируют в распаде нуклида в горячих условиях (см. рис. 3) и в итоге приводят к заметному уменьшению эффективного периода бета-трансформации нуклида. Это, в свою очередь, приводит к необходимости пересмотра параметров модели s-процесса, связанного с балансом распространённости элементов.

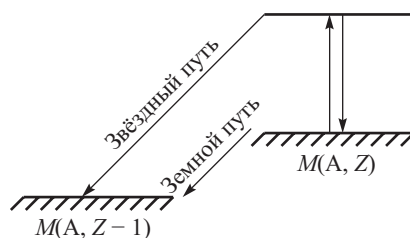


Рис. 3. Земной и звёздный пути распада нуклида

Следует обратить внимание на особенности вклада низких возбуждённых уровней с малой энергией электронного захвата, когда от значения этой энергии (т. е. от разности масс) зависит тип захвата (K, L, или M), а стало быть и эффективный период полураспада нуклида в звёздных условиях. Канал захвата электронов закрывается, если его энергия меньше энергии связи соответствующего электрона в атоме. Кроме того, в звёздах атомы находятся в высокоионизированных состояниях, что тоже влияет на энергетический баланс при бета-превращениях. Поэтому в случае электронного захвата при малых энергиях немаловажно знать с хорошей точностью и большой достоверностью разность масс изучаемых нуклидов в земных условиях. Это оказывается весьма значимым для надёжного восстановления картины распада при высоких температурах.

Анализу влияния возбуждённых состояний на вероятность распада в ^{123}Te посвящена работа [18]. В ней показано, как даже небольшая заселённость возбуждённого уровня с энергией 159 кэВ в ^{123}Te в звёздных условиях приводит к кардинальному изменению вероятности перехода по сравнению с земными условиями. Этот результат позволил улучшить наше понимание хода s-процесса в нуклидах среднего массового числа в так называемых AGB-звёздах [19].

3. Низколежащие возбуждённые уровни ядер и ядерная космохронология. Низколежащие возбуждённые уровни ядер играют важную роль и в другом разделе астрофизики — ядерной космохронологии, которая изучает возраст различных астрофизических объектов, а также время протекания астрофизических процессов. Космохронология использует технику датирования, основанную на изучении распространённости тяжёлых долгоживущих радионуклидов, подобно тому, как геохронология определяет возраст горных пород.

Наиболее интересны для этой области науки нуклиды, у которых периоды полураспада сравнимы или превышают ожидаемое время жизни Вселенной, по последним оценкам составляющее 13,8 млрд лет [20]. К таким нуклидам относятся, например, ^{87}Rb , ^{113}Cd , ^{176}Lu , ^{187}Re , ^{232}Th , ^{238}U и др. Большие времена жизни этих нуклидов являются следствием значительных структурных изменений (разности спинов и чётностей начального и конечного состояний) и очень малых энергий при распаде. В высокотемпературных звёздных условиях нуклиды находятся в основном в высокозарядных ионных состояниях. Энергия распада (т. е. разница масс) для таких ионов может существенно отличаться от энергии распада нейтральных атомов, которая определяется в земных условиях при лабораторных измерениях. Чем меньше энергия распада и чем больше заряд иона, тем больше проявляется вклад этого эффекта. В итоге времена жизни рассматриваемых нуклидов в звёздных и земных условиях могут существенно различаться, что сказывается на анализе хронологии. В изменении эффективного периода полураспада играет роль и рассмотренный в предыдущем параграфе вклад от низколежащих возбуждённых уровней, термодинамически заселяемых при высоких температурах. Данный эффект описан в работе [21] для космохронومتра ^{187}Re . Этот нуклид, согласно теории нуклеосинтеза [17], образуется только в r-процессе быстрого захвата нейтронов, тогда как его дочерний нуклид ^{187}Os образуется в других звёздных объектах в результате совершенно другого процесса (медленного s-процесса). Это иллюстрирует рис. 4. Однако ^{187}Os всё же образуется также в результате бета-распада ^{187}Re , и с учётом этой подпитки от распада рения и знания его периода полураспада в звёздных условиях можно определить возраст Вселенной. В то же время нужно учитывать и обратный процесс «утечки» осмия, который возникает из-за захвата орбитальных электронов низко возбуждёнными состояниями ^{187}Os в условиях звёздной среды, подобно тому, как это обсуждалось в предыдущем параграфе в случае ^{123}Te .

Рис. 4. Пути нуклеосинтеза ^{187}Re и ^{187}Os :

показано, как ^{187}Re образуется только в г-процессе (тонкие линии со стрелками), тогда как ^{187}Os является продуктом только s-процесса (жирная линия со стрелкой). Однако, как указано в тексте и следует из рис. 5, происходит также взаимная подпитка этих двух нуклидов

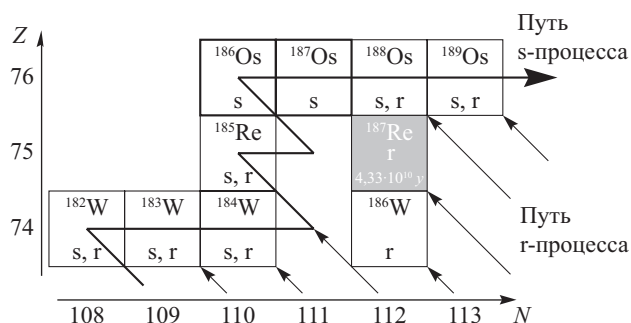
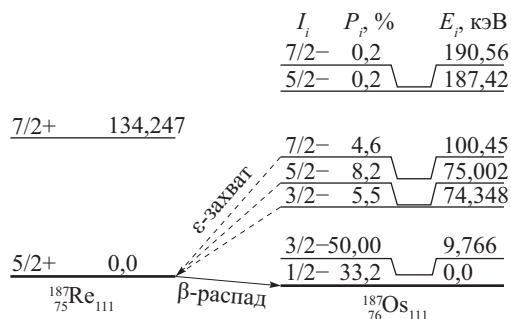


Рис. 5. Схемы возбуждённых состояний ^{187}Re и ^{187}Os , из которых видна энергетическая (E_i) и спиновая (I_i) возможность электронного захвата с уровней от 9,76 до 100,45 кэВ, сильно заселяемых в высокотемпературных условиях (величина P_i на рисунке) на основное состояние ^{187}Re



Классическим же примером анализа данных для целей космохронологии служит соотношение распространённости $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ в природе. Детали этого анализа изложены полно в работе [22].

4. Гамма-лазер на низколежащих изомерах. Отличие гамма-лазера от оптического заключается в том, что он продуцирует энергию накачки в когерентное излучение в гамма-диапазоне.

Создание гамма-лазера давно обсуждается в научных кругах и вызывает интерес различных направлений физики и прикладных наук: квантовой механики, химии, оптической и ядерной спектроскопии, физики твёрдого тела, энергетики и инжиниринга. В 1971 г. В. Гинзбург выделил создание гамма-лазера как актуальную задачу современной физики [23], а в 2003 году в своей нобелевской речи отметил, что эта проблема не потеряла своей значимости. Однако практической реализации гамма-лазер не получил и по сей день.

На данный момент обсуждается несколько подходов к созданию гамма-лазера, но в данной работе мы остановимся лишь на концепции его создания на ядерных изомерах. Как уже отмечалось выше, ядерные изомеры охватывают обширный диапазон времён жизни и энергий возбуждения. В рамках рассматриваемой проблемы это является хорошим основанием для выбора и коротко- и долгоживущих изомеров к их использованию в гамма-лазере, хотя каждый из этих путей содержит определённые трудности при его практическом воплощении. Для реализации гамма-лазера необходимо, чтобы в нём поддерживалась инверсия заселённости ядерных состояний (т. е. в активной среде лазера должно содержаться больше возбуждённых ядер, чем тех, которые находятся в основных состояниях), иначе не будет создаваться лавинного эффекта когерентных гамма-квантов. Первоначально предполагалось использовать изомеры с малыми временами жизни, так в работе [24] определено $\tau < 0,1 \text{ нс}$ (из условия, которое накладывает доплеровское уширение для спектральной линии), необходимое для нарастания

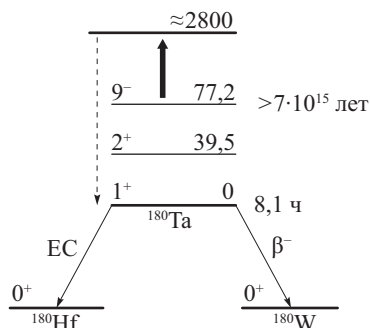


Рис. 6. Иллюстрация возможности создания гамма-лазера путём разрядки изомера через возбуждение промежуточных состояний $^{180}\text{Ta}^*$ (жирная стрелка) на основное состояние (пунктирная стрелка) ^{180}Ta с последующей бета-разрядкой на ^{180}Hf или ^{180}W (тонкие стрелки) [29]:

все энергии уровней даны в килоэлектрон-вольтах, ЕС означает захват ядром орбитального электрона

лавинного эффекта. Однако для корректного функционирования лазера, в котором используются изомеры с такими малыми временами жизни, требуется мощность накачки, не достижимая на данный момент.

Идея о том, что можно избежать подобной трудности, применив долгоживущие изомеры ядер, помещённые в узлы кристаллической решётки для подавления уширения спектральной линии через эффект Мёссбауэра, представлялась чрезвычайно привлекательной [25]. Этот механизм подробнее описан в работах [26, 27]. Однако позднее она оказалась не столь привлекательной, так как эффект Мёссбауэра также накладывал ограничения на возможное время жизни изомеров. Оно оказалось равным $\tau < 10^{-5}$ по данным работы [24], что, разумеется, расширило диапазон возможных изомеров-претендентов для разработки гамма-лазера. Но в целом при таких временах жизни добиться хорошего усиления не представляется возможным. Сложившаяся ситуация в литературе была названа «дилемма гамма-лазера» (graser dilemma), т. е. невозможность оптимизировать свойства, позволяющие избежать уширения спектральной линии и при этом достичь достаточной ядерной инверсной плотности. Наиболее перспективной на данный момент представляется идея создания гамма-лазера, базирующегося на долгоживущих изомерах, хотя она сужает контингент подходящих изомеров-кандидатов для экспериментирования. Эта концепция существенно снижает требования для мощности накачки лазера. Основательный вклад в развитие данной теории был сделан Р. В. Хохловым [28], который предложил схему создания такого гамма-лазера, основанную на выращивании однородных кристаллов долгоживущих изомеров, предварительно произведённых на ядерном реакторе и очищенных от примесей.

Возможность создания гамма-лазера, в котором используется в качестве исходного долгоживущее состояние в ^{180m}Th с энергией 75,3 кэВ (рис. 6), была продемонстрирована в работе [29], авторы которой использовали тормозное излучение для возбуждения уровней этого нуклида; при этом подвергался облучению нуклид, находящийся в изомерном состоянии. Была подобрана энергия, при которой происходила разрядка образовавшегося возбуждённого состояния в основное (пунктирная стрелка на рис. 6) с «высвобождением» изомерной энергии.

Чтобы подавить уширение линии гамма-резонанса, в ряде работ предложено использовать последовательные импульсы с частотой, как можно более точно соответствующей частоте переходов между возбуждёнными уровнями рабочего ядра. Таким образом, помимо достаточного времени жизни накладывается ещё одно условие на изомеры — энергия их возбуждения должна быть известна с очень хорошей точностью.

В работах [23, 30] представлен ряд перспективных изомеров для разработки гамма-лазера.

5. Прецизионная масс-спектрометрия для точных измерений энергий изомерных уровней. Как отмечалось в предыдущих главах, в ряде случаев, связанных с применением изомерных состояний к изучению различных процессов, требуется очень точно знать энергию изомерного уровня. Это в особенности относится к нижайшему энергетическому уровню в ^{229}Th , а также к нуклидам, обсуждаемым как возможные кандидаты для использования в гамма-лазерах. Помимо точности важным условием для измерений должна быть их высочайшая надёжность, свободная от превалирующего влияния систематической ошибки над статистической.

Хорошо известные классические методы измерений изомерных переходов, основанные на гамма- и электронной спектроскопии, обладая высокой прецизионностью, не всегда могут быть эффективно использованы для таких целей. Это связано либо с большими временами жизни изомерных уровней, либо с высокими мультипольностями переходов, существенно подавляющими гамма-излучение, либо с недостоверным знанием схемы гамма/электронного распада изомера. Иногда все эти факторы могут действовать одновременно.

Точные и надёжные измерения могут быть обеспечены ионными ловушками Пеннинга, внедрение которых ознаменовало открытие новой главы в масс-спектрометрии атомов и их ядер [10]. Применение этих приборов (которые ориентируются на калибровку посредством нуклида ^{12}C , являющегося эталоном масс) обеспечивает прямые измерения масс нуклидов, и поэтому большую их надёжность. Энергия изомера определяется как разность масс в изомерном и основном состоянии, когда последнее измерено ловушкой в том же экспериментальном сеансе. Здесь под массами, как обычно, подразумеваются полные энергии связи состояний.

В ловушке Пеннинга заряженная частица (ион) с массой m и зарядом q удерживается в замкнутом пространстве высоко однородным постоянным магнитным и неоднородным постоянным электрическим полями. Масса иона определяется посредством измерения его циклотронной частоты вращения ω_c в магнитном поле B : $\omega_c = qB/(2\pi m)$. Применяются несколько методов измерения циклотронной частоты. Классическим является метод ToF-ICR, в котором циклотронная частота определяется из измерения времени пролёта вылетевшего иона от ловушки до детектора [10]. Таким методом можно получить точность в значении массы, достигающую 10^{-9} , что эквивалентно абсолютному значению 100 эВ при массовом числе $A = 100$. Для улучшения разрешения прибора был предложен метод фазового отображения PI-ICR, который сводится к определению фазы радиального движения иона в ловушке по её проекции на позиционно-чувствительном детекторе, расположенном на расстоянии около 1 м от центра ловушки [31]. Этим методом удалось почти в 5 раз увеличить точность измерения массы, доведя её до относительного значения $2 \cdot 10^{-10}$. Соответствующее ему абсолютное значение точности энергии изомерного уровня ≈ 20 эВ достигает и даже превосходит возможности гамма- и электронной спектроскопии долгоживущих низко расположенных состояний. Анализ литературных данных об изомерах [6] показывает, что точности изомерных уровней, известные к настоящему времени из спектроскопии для долгоживущих нуклидов с временами жизни, превышающими 1 год, не превосходят нескольких десятков электрон-вольт.

В то же время достигнутая в ионных ловушках прецизионность не является предельной, и имеется разработка [32], которая позволяет создать прибор, способный довести точность определения энергии изомерного уровня до 1 эВ и даже выше, что окажется бесценным результатом, например, для нуклидов ^{229}Th и ^{180}Ta . В этом приборе используется комбинация из пяти ионных ловушек Пеннинга, между которыми распределены

различные функции, что позволит существенно уменьшить систематическую ошибку измерения. Такой прибор создаётся в институте М. Планка в Хайдельберге (Германия).

Заключение. Явление ядерной изомерии, под которой понимается наличие в ядре состояний, различающихся своей внутренней структурой, представляет интерес не только для ядерной физики, но и для других областей науки. Особую категорию составляют изомерные состояния, характеризующиеся малыми энергиями возбуждения. Именно они находят приложение в ядерной астрофизике, космохронологии, в задачах создания гамма-лазера и метрологии. На них обращено основное внимание в этом кратком обзоре, который не претендует на исчерпывающую полноту, однако охватывает широкий круг областей науки, для которых знание свойств низкоэнергетичных изомеров оказывается первостепенным. Так, например, знание свойств состояния недавно открытого изомера ^{229m}Th с энергией возбуждения в атомном диапазоне сулит проникновение как в фундаментальную физику, так и в прикладные вопросы, из которых отметим возможность создания твердотельного эталона частоты с параметрами, намного превосходящего существующие. Наиболее реальные возможности создания гамма-лазера также связываются с использованием низковозбуждённых и долгоживущих изомерных состояний. Показано, как знание свойств низковозбуждённых состояний в земных условиях позволяет трансформировать их на звёздные условия, в которых происходит зарождение элементов во Вселенной и в которых ядерные процессы проходят ускоренно.

Таким образом, в работе выполнен сравнительный анализ различных проблем и актуальных задач, стоящих перед современной физикой, который в такой совокупности до настоящего времени ещё не был представлен в литературе. Для высокопрецизионных измерений энергий возбуждения низкоэнергетичных изомерных состояний с успехом может быть использована масс-спектрометрия нового поколения.

Литература

1. *Soddy F.* The complexity of the chemical elements // *Nature*. 1917. Vol. 99, N 2491. P. 433–438.
2. *Hahn O.* Über ein neues radioaktives Zerfallsprodukt im Uran // *Natural Sci.* 1921. Vol. 9. P. 84.
3. *Kurchatov B., Kurchatov J., Latychev G.* La désintégration du bore par des neutrons lents // *Comptes Rendus Acad. Sci.* 1935. Vol. 200. P. 1199.
4. *Szillard L., Chalmers T. A.* Radioactivity Induced by Neutrons // *Nature*. 1935. Vol. 135. P. 98.
5. *Weizsäcker C. F.* Metastabile Zustände der Atomkerne // *Naturwissenschaften*. 1936. Vol. 24, iss. 51. P. 813.
6. *Kumar Jain A., Maheshwari B., Garg S., Patial M., Singh B.* Atlas of nuclear isomers // *Nuclear Data Sheets*. 2015. Vol. 128. P. 1–130.
7. *Audi G., Kondev F. G., Wang M., Pfeiffer B., Sun X., Blachot J., MacCormick M.* The Nubase 2012 evaluation of nuclear properties // *CPC*. 2012. Vol. 36, N 12. P. 1157–1286.
8. *Русинов Л. И.* Изомерия атомных ядер // *Усп. физ. наук*. 1961. Т. 73, вып. 4. С. 615–630.
9. *Physics of isomers.* Proc. Intern. Workshop in St. Petersburg / ed. by F. F. Karpeshin. 2000.
10. *Blaum K., Novikov Yu. N., Werth G.* Penning traps as a versatile tool for precise experiments in fundamental physics // *Contemporary Phys.* 2010. Vol. 51, iss. 10. P. 149–175.
11. *Kroger L., Reich C.* Features of the low-energy level scheme of ^{229}Th as observed in the α -decay of ^{233}U // *Nucl. Phys.* 1976. Vol. 259. P. 29–60.
12. *Wense L., Seiferle B., Laatiaoui M., Neumayr J. B., Maier H. J., Wirth H. B., Mokry C., Runke J., Eberhardt K., Düllmann C. E., Trautmann N. G., Thierolf P. G.* Direct detection of the ^{229}Th nuclear clock transition // *Nature*. 2016. Vol. 533, iss. 7601. P. 47–51.
13. *Beck B. R., Becker J. A., Beiersdorfer P., Brown G. V., Moody K. J., Wilhelm J. B., Porter F. S., Kilbourne C. A., Kelley R. L.* Energy splitting of the ground-state doublet in the nucleus ^{229}Th // *Phys. Rev. Lett.* 2007. Vol. 98, iss. 14. 142501.
14. *Tkalya E. V., Schneider C., Jeet J., Hudson E. R.* Radiative lifetime and energy of the low-energy isomeric level in ^{229}Th // *Phys. Rev. (C)*. 2015. Vol. 92, iss. 5. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.92.054324>.
15. *Seiferle B., Wense L., Thierolf P. G.* Lifetime measurement of the ^{229}Th nuclear isomer // *Phys. Rev. Lett.* 2017. Vol. 118. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.042501>.

16. Гусев Ю. И., Новиков Ю. Н., Попов А. В., Тихонов В. И. Об изучении распада изомера ^{229}Th методом конверсионной спектроскопии // Изв. РАН. Сер. физич. 2016. Т. 80, № 8. С. 962–966.
17. Burbidge E. M., Burbidge G., Fowler W. A., Hoyle F. Synthesis of the elements in stars // Rev. Mod. Phys. 1957. Vol. 29, iss. 4. P. 547.
18. Filianin P., Schmidt S., Blaum K., Block M., Eliseev S., Giacoppo F., Goncharov M., Lautenschlaeger F., Novikov Yu. N., Takahashi K. The decay energy of the pure s-process nuclide ^{123}Te // Phys. Lett. (B). 2016. Vol. 758. P. 407–411.
19. Takahashi K., Blaum K., Novikov Yu. Synthesis of the s-only $^{122}, ^{123}, ^{124}\text{Te}$ isotopes and the selective depletion of ^{123}Te by electron capture process in massive stars // Astrophys. J. 2016. Vol. 819. P. 118.
20. Planck Collaboration: Ade P. A. R. et al. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters // Astronomy & Astrophysics. 2014. Vol. 571. P. 66.
21. Nesterenko D., Eliseev S., Blaum K., Block M., Chenmarev S. et al. Direct determination of the atomic mass difference of ^{187}Re and ^{187}Os for neutrino physics and cosmochemistry // Phys. Rev. (C). 2014. Vol. 90, iss. 4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.90.042501>.
22. Крамаровский Я. М., Чечев В. П. Синтез элементов во Вселенной. М.: Наука, 1987. 160 с.
23. Гинзбург В. Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными? // Наука и жизнь. 1971. № 2. С. 9–17.
24. Заdernовский А. А. Гамма-лазер со скрытой инверсией населённости ядерных состояний // РЭНСИТ. 2009. № 1. С. 34.
25. Baldwin G. C., Solem J. C. Approaches to the development of gamma-ray lasers // Rev. Mod. Phys. 1981. Vol. 53. P. 687.
26. Baldwin G. C., Solem J. C. Recoilless gamma-ray lasers // Rev. Mod. Phys. 1997. Vol. 69. P. 1085.
27. Rivlin L. A. Gamma-ray laser operating with the assistance of the recoil of free nuclei // Quantum Electronics. 1999. Vol. 29, N 6. P. 467.
28. Хохлов Р. В. К вопросу о возможности создания гамма-лазера на основе радиоактивных кристаллов // Письма в Журн. эксп. теор. физики. 1972. Т. 15, № 9. С. 580–583.
29. Collins C. B., Carroll J. J. // Laser Phys. 1999. Vol. 9. P. 1.
30. Carroll J. J., Karamian S. A., Rivlin L. A., Zadernovsky A. A. X-ray-driven gamma emission // Hyperfine Interactions. 2001. Vol. 135, N 1. P. 3.
31. Eliseev S., Blaum K., Block M., Droese C., Goncharov M., Minaya Ramirez E., Nesterenko D. A., Novikov Yu. N., Schweikhard L. Phase-imaging ion-cyclotron-resonance measurements for short-lived nuclides // Phys. Rev. Lett. 2013. Vol. 110, iss. 8. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.082501>.
32. Repp J., Böhm C., Crespo López-Urrutia J. R. et al. PENTATRAP: a novel cryogenic multi-Penning-trap experiment for high-precision mass measurements on highly charged ions // Appl. Phys. (B). 2012. Vol. 107. P. 983.

References

1. Soddy F. The complexity of the chemical elements. *Nature*, 1917, vol. 99, no 2491, pp. 433–438.
2. Hahn O. Über ein neues radioaktives Zerfallsprodukt im Uran. *Natural Sci.*, 1921, vol. 9, pp. 84.
3. Kurtchatov B., Kurtchatov J., Latychev G. La désintégration du bore par des neutrons lents. *Comptes Rendus Acad. Sci.*, 1935, vol. 200, pp. 1199.
4. Szilard L., Chalmers T. A. Radioactivity Induced by Neutrons. *Nature*, 1935, vol. 135, pp. 98.
5. Weizsäcker C. F. Metastabile Zustände der Atomkerne. *Naturwissenschaften*, 1936, vol. 24, iss. 51, pp. 813.
6. Kumar Jain A., Maheshwari B., Garg S., Patial M., Singh B. Atlas of nuclear isomers. *Nuclear Data Sheets*, 2015, vol. 128, pp. 1–130.
7. Audi G., Kondev F. G., Wang M., Pfeiffer B., Sun X., Blachot J., MacCormick M. The Nubase 2012 evaluation of nuclear properties. *CPC*, 2012, vol. 36, no 12, pp. 1157–1286.
8. Rusinov L. I. Izomeriia atomnykh iader [Nuclear isomerism]. *Usp. fiz. nauk.* [Advances in Physical Sciences], 1961, vol. 73, iss. 4, pp. 615–630. (In Russian)
9. Physics of isomers. *Proc. Intern. Workshop in St. Petersburg*. Ed. by F. F. Karpeshin. 2000.
10. Blaum K., Novikov Yu. N., Werth G. Penning traps as a versatile tool for precise experiments in fundamental physics. *Contemporary Phys.*, 2010, vol. 51, iss. 10, pp. 149–175.
11. Kroger L., Reich C. Features of the low-energy level scheme of ^{229}Th as observed in the α -decay of ^{233}U . *Nucl. Phys.*, 1976, vol. 259, pp. 29–60.
12. Wense L., Seiferle B., Laatiaoui M., Neumayr J. B., Maier H. J., Wirth H. B., Mokry C., Runke J., Eberhardt K., Düllmann C. E., Trautmann N. G., Thierolf P. G. Direct detection of the ^{229}Th nuclear clock transition. *Nature*, 2016, vol. 533, iss. 7601, pp. 47–51.

13. Beck B. R., Becker J. A., Beiersdorfer P., Brown G. V., Moody K. J., Wilhelmy J. B., Porter F. S., Kilbourne C. A., Kelley R. L. Energy splitting of the ground-state doublet in the nucleus ^{229}Th . *Phys. Rev. Lett.*, 2007, vol. 98, iss. 14, 142501.
14. Tkalya E. V., Schneider C., Jeet J., Hudson E. R. Radiative lifetime and energy of the low-energy isomeric level in ^{229}Th . *Phys. Rev. (C)*, 2015, vol. 92, iss. 5, <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.92.054324>.
15. Seiferle B., Wense L., Thirof P. G. Lifetime measurement of the ^{229}Th nuclear isomer. *Phys. Rev. Lett.*, 2017, vol. 118, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.042501>.
16. Gusev Iu. I., Novikov Iu. N., Popov A. V., Tikhonov V. I. Ob izuchenii raspada izomera ^{229}Th metodom konverzionnoi spektroskopii [About isomer disintegration studying ^{229}Th by method of conversion spectroscopy]. *Izv. RAN. Ser. fizich. [Russian Physics Bulletin]*, 2016, vol. 80, no 8, pp. 962–966. (In Russian)
17. Burbidge E. M., Burbidge G., Fowler W. A., Hoyle F. Synthesis of the elements in stars. *Rev. Mod. Phys.*, 1957, vol. 29, iss. 4, pp. 547.
18. Filianin P., Schmidt S., Blaum K., Block M., Eliseev S., Giacoppo F., Goncharov M., Lautenschlaeger F., Novikov Yu. N., Takahashi K. The decay energy of the pure s-process nuclide ^{123}Te . *Phys. Lett. (B)*, 2016, vol. 758, pp. 407–411.
19. Takahashi K., Blaum K., Novikov Yu. Synthesis of the s-only $^{122}, ^{123}, ^{124}\text{Te}$ isotopes and the selective depletion of ^{123}Te by electron capture process in massive stars. *Astrophys. J.*, 2016, vol. 819, pp. 118.
20. Planck Collaboration: Ade P. A. R. et al. Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 2014, vol. 571, pp. 66.
21. Nesterenko D., Eliseev S., Blaum K., Block M., Chenmarev S. et al. Direct determination of the atomic mass difference of ^{187}Re and ^{187}Os for neutrino physics and cosmochronology. *Phys. Rev. (C)*, 2014, vol. 90, iss. 4, <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.90.042501>.
22. Kramarovskii Ia. M., Chechev V. P. *Sintez elementov vo Vselesnoi [Synthesis of elements in the Universe]*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 160 p. (In Russian)
23. Ginzburg V. L. Kakie problemy fiziki i astrofiziki predstavliaiutsia seichas osobenno vazhnymi i interesnymi? What problems of physics and astrophysics are represented especially important and interesting now? *Nauka i zhizn' [Science and life]*, 1971, no 2, pp. 9–17. (In Russian)
24. Zadernovskii A. A. Gamma-lazer so skrytoi inversiei naseleennosti iadernykh sostoianii [The gamma laser with the hidden inversion of densities of population of nuclear states]. *RENSIT*, 2009, no 1, pp. 34. (In Russian)
25. Baldwin G. C., Solem J. C. Approaches to the development of gamma-ray lasers. *Rev. Mod. Phys.*, 1981, vol. 53, pp. 687.
26. Baldwin G. C., Solem J. C. Recoilless gamma-ray lasers. *Rev. Mod. Phys.*, 1997, vol. 69, pp. 1085.
27. Rivlin L. A. Gamma-ray laser operating with the assistance of the recoil of free nuclei. *Quantum Electronics*, 1999, vol. 29, no 6, pp. 467.
28. Khokhlov R. V. K voprosu o vozmozhnosti sozdaniia gamma-lazera na osnove radioaktivnykh kristallov [To a question of a possibility of creation of the gamma laser on the basis of radioactive crystals]. *Pisma v Zhurn. eksp. teor. fiziki*, 1972, vol. 15, no 9, pp. 580–583. (In Russian)
29. Collins C. B., Carroll J. J. *Laser Phys.*, 1999, vol. 9, pp. 1.
30. Carroll J. J., Karamian S. A., Rivlin L. A., Zadernovsky A. A. X-ray-driven gamma emission. *Hyperfine Interactions*, 2001, vol. 135, no 1, pp. 3.
31. Eliseev S., Blaum K., Block M., Droese C., Goncharov M., Minaya Ramirez E., Nesterenko D. A., Novikov Yu. N., Schweikhard L. Phase-imaging ion-cyclotron-resonance measurements for short-lived nuclides. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, vol. 110, iss. 8, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.082501>.
32. Repp J., Böhm C., Crespo López-Urrutia J. R. et al. PENTATRAP: a novel cryogenic multi-Penning-trap experiment for high-precision mass measurements on highly charged ions. *Appl. Phys. (B)*, 2012, vol. 107, pp. 983.

Статья поступила в редакцию 15 мая 2017 г.

Контактная информация

Мартынова Наталья Сергеевна — студентка; e-mail: martynova.natali.serg@gmail.com

Елисеев Сергей Александрович — доктор физико-математических наук.

Новиков Юрий Николаевич — доктор физико-математических наук, профессор.

Филианин Павел Евгеньевич — аспирант.

Martynova N. S. — student; e-mail: martynova.natali.serg@gmail.com

Eliseev S. A. — Doctor of Physics and Mathematics.

Novikov Yu. N. — Doctor of Physics and Mathematics, Professor.

Filianin P. E. — post-graduate student.